



Ciclo Atkinson: una alternativa para mejorar la eficiencia en motores de combustión interna

Atkinson cycle: a way to improve efficiency in internal combustion engines

Édison Henao-Castañeda^{1a}, Carlos Romero-Piedrahíta², Mauricio Monroy-Jaramillo^{1b}

¹Manufactura y diseño de máquinas, Facultad de Ingeniería Mecánica, Universidad Tecnológica de Pereira, Colombia. Orcid: ^a 0000-0001-9722-1448, ^b 0000-0002-5279-0505.

Correos electrónicos: ^a edisonhenao@utp.edu.co, ^b mauriciomonroy@utp.edu.co

² Tecnología Mecánica, Facultad de Tecnologías, Universidad Tecnológica de Pereira, Colombia.

Orcid: 0000-0001-5647-1918. Correo electrónico: cromero@utp.edu.co

Recibido: 29 junio, 2018. Aceptado: 28 diciembre, 2018. Versión final: 6 febrero, 2019.

Resumen

Los ciclos expandidos, como el desarrollado por Atkinson en motores de combustión interna (MCI), se utilizan para aprovechar mejor el combustible y aumentar la eficiencia térmica. En el presente artículo se presentan, desde el punto de vista de la mecánica de maquinaria y la teoría de grafos, las estructuras cinemáticas de Watt y Stephenson, que, mediante arreglos multieslabón, permiten recrear el mecanismo presentado por James Atkinson. A través de un análisis cinemático, se evidencian los problemas relacionados con las velocidades y aceleraciones del pistón que presentan estas estructuras cinemáticas y que comprometen su producción masiva. No obstante, se retoma el ciclo de Atkinson como posibilidad constructiva actualmente, cuando se dispone de avanzadas herramientas de *hardware* electrónico y de control.

Palabras clave: ciclo Atkinson; ciclo expandido; estructura cinemática; mecanismo multieslabón.

Abstract

Expanded cycles, like the one developed by Atkinson for internal combustion engines (ICM), are used to make better use of fuel and increase thermal efficiency. In this paper, the Watt's and Stephenson's kinematic structures is presented from the point of view of the mechanics of machinery and graphs theory, which by means of multi-link arrangements, allow recreating the mechanism presented by James Atkinson. By applying a kinematical analysis to these kinematic structures, the problems related to the piston speeds and accelerations that prevent the massive introduction of the "classical Atkinson cycle" in automotive engines are revealed. Despite this fact, the Atkinson cycle is highlighted in this work as a real promising constructive technology, given the advances in electronic hardware and control technologies.

Keywords: expanded cycle; kinematic structure; multi-link mechanism; Atkinson cycle.

1. Introducción

Desde su invención, el motor de combustión interna ha sido objeto de desarrollo, en el afán de mejorar sus prestaciones e incrementar su eficiencia. Es así como se

han sugerido modificaciones a los ciclos Otto y Diesel que buscan no solo aprovechar más eficientemente la energía suministrada por el combustible, sino también la reducción de las emisiones contaminantes. Dentro de las modificaciones, merecen mención los ciclos de



expansión prolongada (ciclos de Miller y Atkinson; refiriéndose a los inventores Ralph Miller y James Atkinson), en los cuales la relación de compresión efectiva es menor que la relación de expansión efectiva. Otras medidas se relacionan con el uso de combustibles alternativos, como el hidrógeno y los biocombustibles, como lo han descrito en sus trabajos Díaz *et al.* [1] y García *et al.* [2].

En el ciclo propuesto por Atkinson, mediante la adición de eslabones a la cadena cinemática básica de un motor (mecanismo multieslabón), la carrera de expansión se prolonga hasta la presión barométrica, con el fin de extraer todo el potencial de trabajo disponible en los gases de trabajo del cilindro, a la vez que las carreras de admisión y compresión permanecen similares a las de un ciclo Otto. Posteriormente, y en la actualidad, el ciclo Atkinson se implementa manipulando las fases y tiempos valvulares de admisión y escape, y se retarda (LIVC) o se hace avanzar (EIVC) el tiempo de cierre de las válvulas de admisión en los ciclos Otto y Diesel.

La reducción del tamaño de los MCI, esto es, la disminución simultánea del volumen desplazado y el aumento de la presión media indicada (IMEP) mediante turboalimentación, se reconoce como un método adecuado para mejorar la eficiencia indicada de conversión de combustible y la reducción de las emisiones de CO₂ y NO_x. Gheorghiu [3] describe la tendencia actual relacionada con la ultrareducción de tamaño en los motores, y expresa que es posible implementarla mediante ciclos Atkinson reales utilizando mecanismos de manivela asimétricos, combinados con turboalimentación de alta presión mediante varias etapas y un interenfriamiento eficiente, entre otras tecnologías.

Actualmente, la implementación del ciclo de Atkinson en los motores se facilita por la utilización de dispositivos para sincronización de válvulas variables (VVT). Con estos dispositivos VVT se puede retrasar el cierre de la válvula de admisión (LIVC) [4] [5] para reducir la relación de compresión efectiva (ECR), y de este modo evitar las detonaciones plausibles por una mayor relación de compresión geométrica (GCR). De esta forma, en un motor de ciclo Atkinson moderno se puede lograr una mayor relación de expansión y mejorar la eficiencia térmica.

En su trabajo, Hou [6] ha realizado comparaciones de los rendimientos de los ciclos atmosféricos Atkinson y Otto considerando la transferencia de calor. A su vez, ha examinado la influencia de parámetros como la transferencia de calor y las constantes de combustión, la relación de compresión y la temperatura del aire de

admisión sobre la salida neta de trabajo, frente a características de eficiencia, trabajo máximo y la eficiencia correspondiente para el trabajo máximo.

Este artículo comprende inicialmente una descripción de los ciclos Otto y Atkinson; posteriormente, se presenta desde el punto de vista de la mecánica de maquinaria el esquema cinemático de mecanismos que permiten desligar las carreras de admisión y compresión de las de expansión y escape. Finalmente, se relacionan formas actuales para lograr ciclos con expansión extendidas, y se analiza el eslabonamiento propuesto por James Atkinson.

2. Implementación del ciclo Atkinson

El uso de motores de combustión interna operando bajo el ciclo Otto se mantiene en el mundo y cada vez se implementan nuevas e innovadoras formas para mejorar su eficiencia. La expansión extendida se presenta en la actualidad como una alternativa que permite aprovechar de un modo más eficiente la energía suministrada por el combustible [7] [8].

En la figura 1 se presenta el ciclo teórico Otto, y en la figura 2 la eficiencia térmica (respecto a la relación de compresión y a la relación de calores específicos) asumiendo gas ideal (aire) como fluido de trabajo para todos los procesos del ciclo, esto es, compresión adiabática (proceso 1-2), aumento de presión a volumen constante (proceso 2-3), expansión adiabática (proceso 3-4conv) y reducción de volumen a presión constante. Para el caso de la expansión extendida (área sombreada), la presión alcanza valores cercanos al atmosférico, aprovechando mejor la energía del combustible. Por tanto, para la misma relación de compresión, el ciclo de Atkinson es más eficiente que el ciclo de Otto, debido a la expansión más completa del fluido de trabajo.

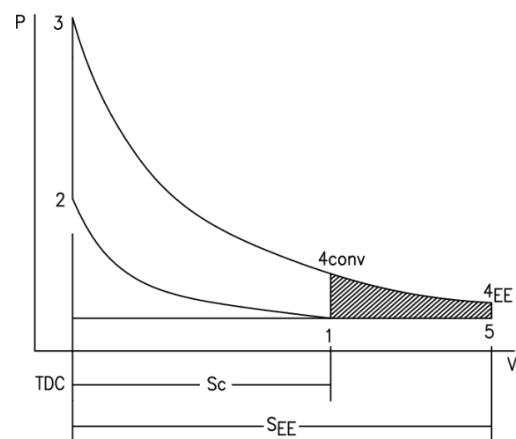


Figura 1. Ciclo ideal Otto.

La eficiencia termodinámica del ciclo relacionada con parámetros físicos del motor, tales como la relación de compresión y el fluido de trabajo, es equivalente a

$\eta = 1 - \frac{1}{r_c^{k-1}}$, donde r_c es la relación de compresión y k es la relación de calores específicos [9].

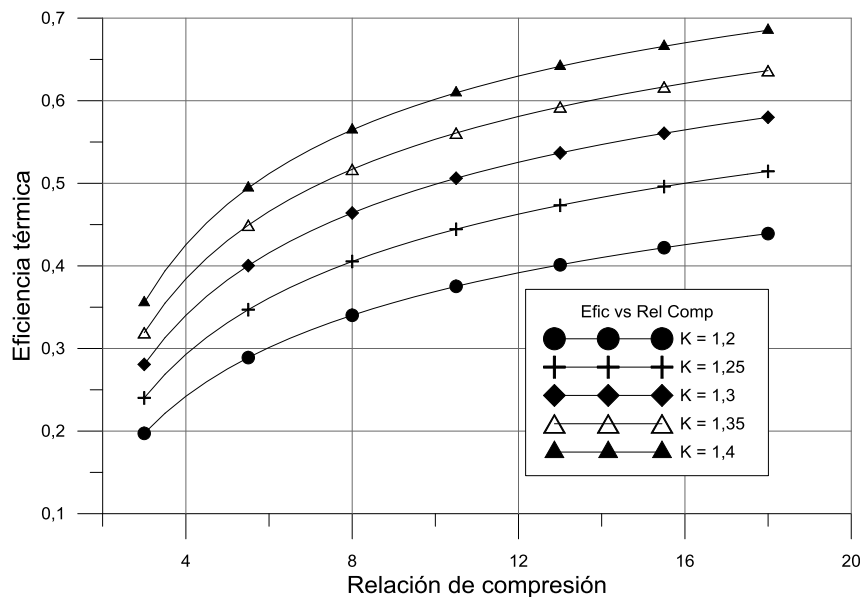


Figura 2. Eficiencia térmica respecto a la relación de compresión.

Puede observarse en la gráfica anterior que la eficiencia aumenta al incrementar la relación de compresión, o al incrementar la razón de calores específicos o ambas. Ahora bien, al incrementar la relación de compresión, se aumenta la capacidad de expansión de los gases después de la combustión.

A continuación, considerando el trabajo realizado por Hoeltgebaum [10], se describe brevemente la estructura y la cinemática de mecanismos que permiten mejorar la eficiencia a partir de la ejecución del ciclo de Atkinson.

2.1. Ciclo Atkinson planteado por James Atkinson

Las modificaciones planteadas por James Atkinson al mecanismo manivela-deslizador tradicional se resumen así:

- Aumento del número de eslabones:

Desde el punto de vista de la mecánica de maquinaria, el esquema cinemático para el ciclo de Atkinson es obtenido rompiendo el par cinemático que une el cigüeñal con la biela (junta B) e insertando en dicho punto una nueva cadena cinemática compuesta por los eslabones 3 y 4 (figura 3). Por lo anterior, se pasa de tener una cadena cinemática de cuatro eslabones a otra con seis, denominada multieslabón. En general, este tipo de cadenas cinemáticas aplicadas a los motores de

combustión interna poseen dos eslabones terciarios, uno de ellos es el bastidor y cuatro eslabones binarios.

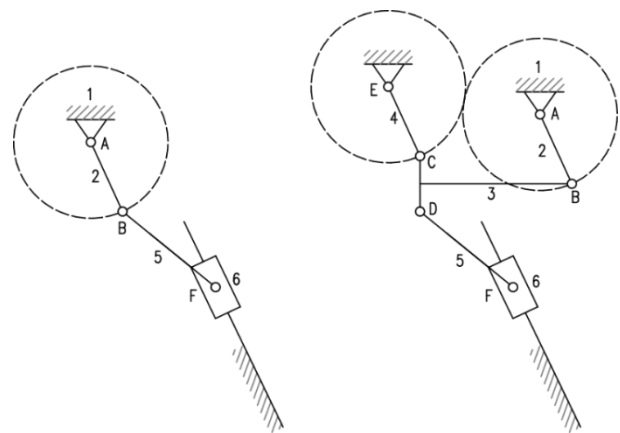


Figura 3. Esquema cinemático correspondiente a los motores de ciclo Otto y Atkinson.

En la figura 4 se ilustra la estructura cinemática y el grafo convencional de mecanismos conformados por seis eslabones aplicables a mecanismos de relación de compresión variable (RCV). En estas, al asignarle al bastidor uno de los eslabones terciarios y hacer que el pistón sea binario y que entre en par cinemático con el bastidor, se obtienen tres estructuras cinemáticas, de las

cuales, una de ellas corresponde al mecanismo para el ciclo Atkinson (véase figura 4).

Con el fin de tener uniformidad en el estudio, los eslabones serán nombrados del siguiente modo: el bastidor tomará el número 1, el cigüeñal o manivela el número 2, el eslabón cuya junta es móvil y entra en par cinemático con el bastidor es nombrado eslabón de control y tomará el número 4, a la biela le corresponderá el número 5 y al pistón el 6. El número 3 se reserva para aquel eslabón encargado de cerrar los diferentes lazos, y se llama eslabón auxiliar.

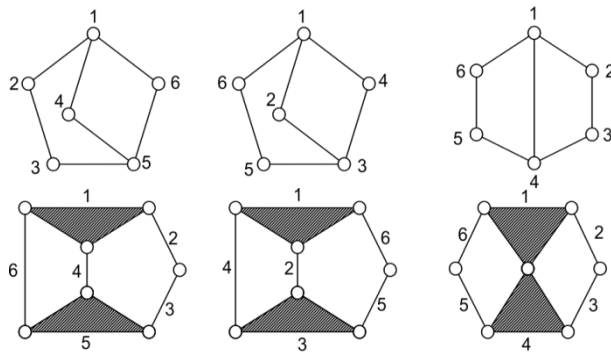


Figura 4. Eslabonamiento planar de seis barras y un grado de libertad. Superior, estructura cinemática. Inferior, grafo convencional.

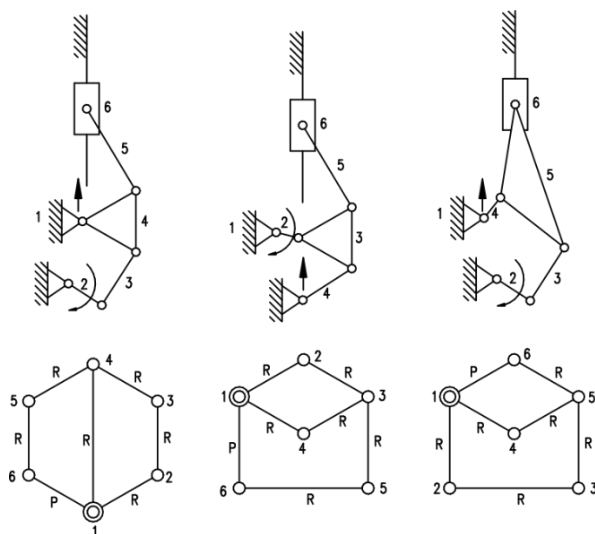


Figura 5. Eslabonamientos de Watt y Stephenson con sus estructuras cinemáticas no isomórficas.

La figura 5 muestra las posibles configuraciones de mecanismos que se obtienen con 6 eslabones, donde la primera de ellas se corresponde con eslabonamientos de Watt, y las otras dos, con eslabonamientos de

Stephenson. Además, son representadas las respectivas estructuras cinemáticas no isomórficas. Se descarta la tercera configuración, debido a que la biela es un eslabón terciario, hecho que aumentaría la inercia y las fuerzas de fricción entre el pistón y el cilindro. Las otras dos configuraciones permiten implementar el ciclo de Atkinson.

- Desligamiento de la razón de compresión y la razón de expansión:

A pesar que en su concepción inicial el motor de ciclo Atkinson presentaba problemas asociados al aumento de tamaño, al incremento en el peso, al incremento en las vibraciones del bloque del motor causadas por el empeoramiento de la curva de aceleración y al aumento en la fricción asociada al incremento de eslabones, este fue el inicio para tecnologías híbridas aplicadas hoy en día, y por esta razón se dedica este espacio al estudio cinemático, con el fin de resaltar la importancia de separar las razones de compresión y expansión.

En la figura 6 se observa el desplazamiento del pistón para una revolución del cigüeñal, y son notables las siguientes características:

- El ciclo Otto requiere dos revoluciones para lograr las cuatro carreras, y cada una de ellas posee el mismo desplazamiento.
- El ciclo Atkinson realiza las cuatro carreras en una revolución, y son mayores las carreras y tiempos de expansión y escape que las carreras y tiempos de admisión y compresión.
- En el ciclo Atkinson permite separar las carreras de admisión y de expansión a partir del cambio posicional del par cinemático E.

2.2. Implementación del ciclo Atkinson actualmente

Actualmente, los ciclos con expansión prolongada se implementan con cierre de válvula de admisión temprana (EIVC) o tardía (LIVC). El efecto primario de EIVC y LIVC es una reducción de la temperatura al final de la carrera de compresión. La temperatura más baja permite el uso de relaciones de compresión geométrica más altas que producen una relación de expansión más larga y un aumento de eficiencia. Las válvulas de admisión se cierran después de que el pistón haya pasado el punto muerto inferior. Una parte del aire de carga es entonces eventualmente devuelta al colector de admisión, lo que da como resultado una carrera de compresión más corta que la carrera de expansión. Una desventaja de este esquema es que la mezcla que ingresa al cilindro es

estrangulada, y, debido al cierre temprano o tardío de la válvula de entrada, se presentan pérdidas de bombeo.

Durante la última década, diversas estrategias para mejorar la eficiencia del combustible han sido investigadas por fabricantes de automóviles, como Toyota, Mazda, Nissan y Ford. Los ciclos con expansión prolongada son actualmente interesantes para aplicaciones híbridas, en las que la menor densidad de potencia se compensa adicionando motores eléctricos. Actualmente, modelos de automóviles como el Toyota Prius y la familia Skyactive-G de Mazda utilizan LIVC para mejorar la eficiencia de combustible.

Volvo Car Corporation (VCC) también realiza investigaciones con el ciclo de Atkinson, como una

estrategia para futuras mejoras en la eficiencia de combustible.

3. Análisis relacionado con el ciclo de Atkinson

Los motores de combustión interna de encendido por chispa de tipo Atkinson no lograron un impacto comercial significativo, debido, aparentemente, a una combinación de complejidad mecánica, particularmente cuando se empleó una relación de expansión sustancialmente extendida, una potencia máxima reducida en comparación con los motores convencionales de tamaño similar [4].

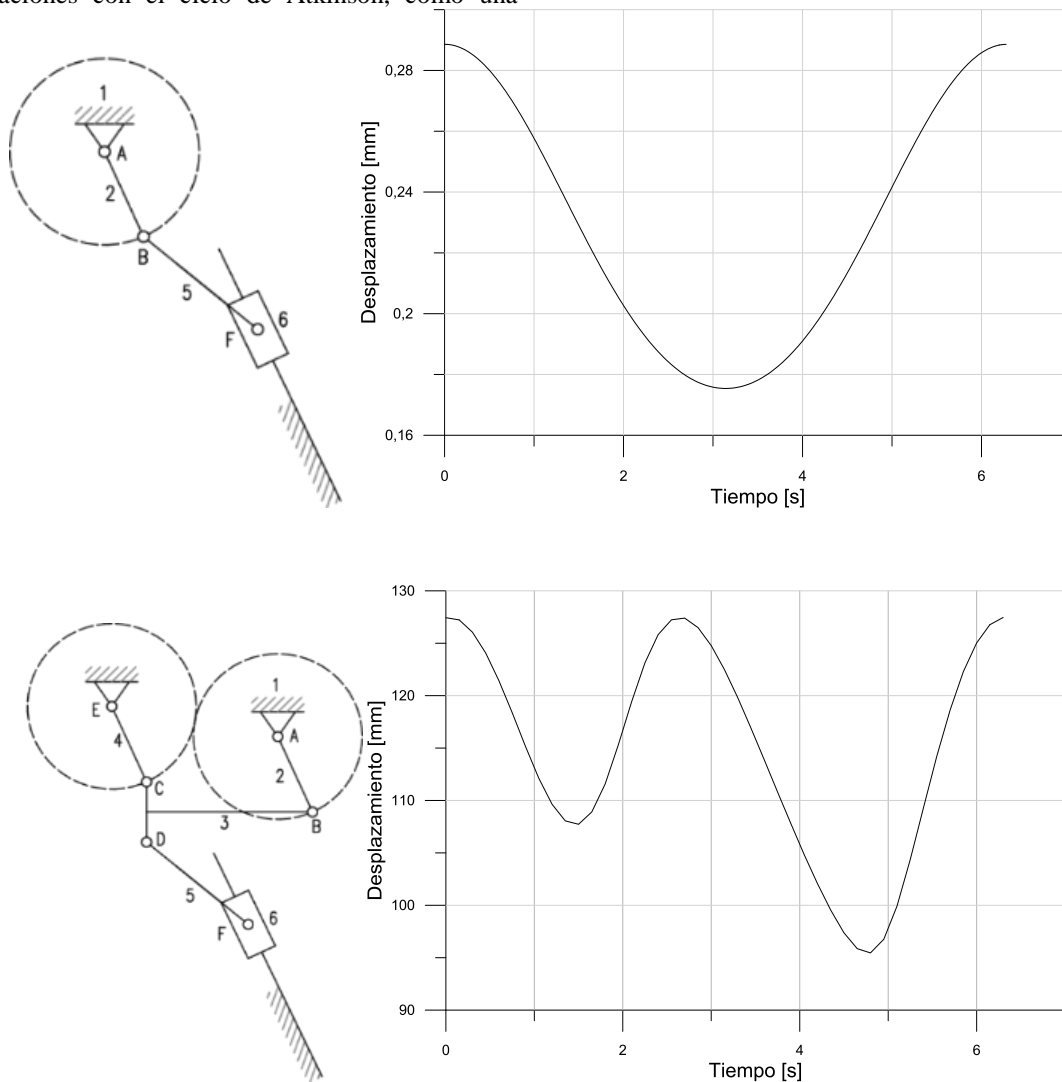


Figura 6. Desplazamiento del pistón para los ciclos Otto y Atkinson.

3.1 Cinemática del mecanismo propuesto por James Atkinson

En la figura 7 se presentan las velocidades y aceleraciones para los ciclos Otto y Atkinson. Para este último, se observa un aumento considerable en la magnitud de la velocidad, además de un alejamiento de la característica sinusoidal deseada. Para el caso de la aceleración, es aún más crítico el aumento de su magnitud y sus cambios repentinos para todo el régimen de movimiento. Lo anterior limita la operación del motor a velocidades de rotación elevadas, puesto que la sobre-aceleración (Yerk) podría presentar valores elevados.

En las figuras 8 y 9 se presentan las velocidades y aceleraciones con respecto al desplazamiento del pistón para los ciclos Otto y Atkinson.

En primera figura 8 de la parte superior (ciclo Otto), se observa cómo la velocidad mantiene valores simétricos para cada posición del pistón, lo que indica que no se presentan cambios bruscos que impidan llegar a altas velocidades de rotación del motor, mientras que, en la segunda figura, correspondiente al ciclo Atkinson, no solo se presentan valores más elevados en las velocidades, sino que entre estas se presentan cambios más severos para puntos consecutivos de desplazamiento del pistón.

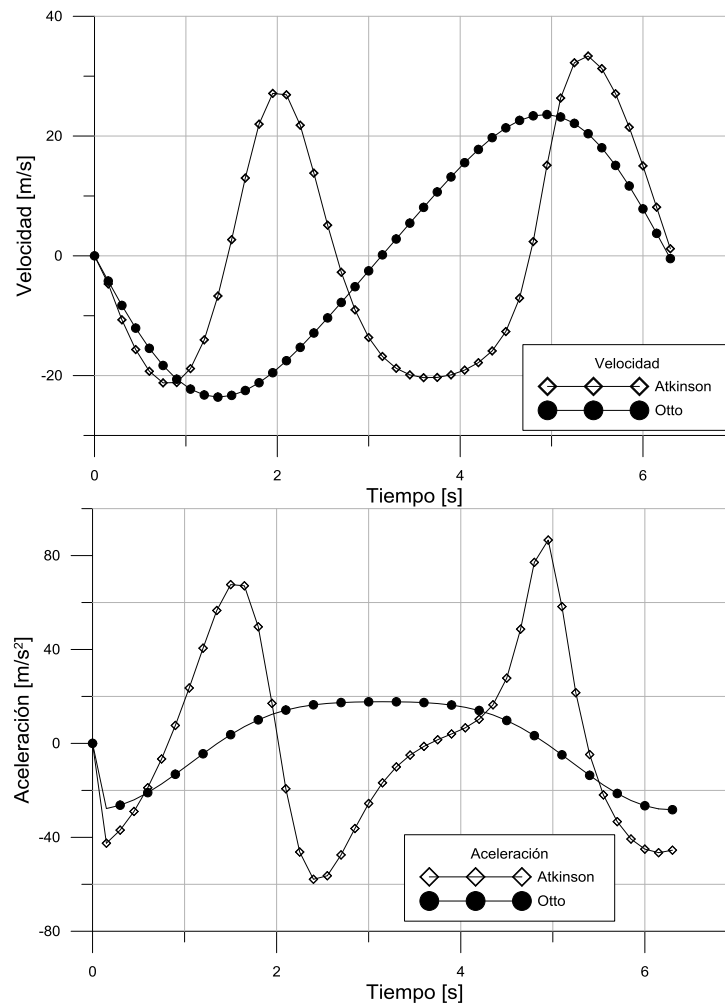


Figura 7. Velocidad y aceleración del pistón operando bajo los ciclos Otto y Atkinson

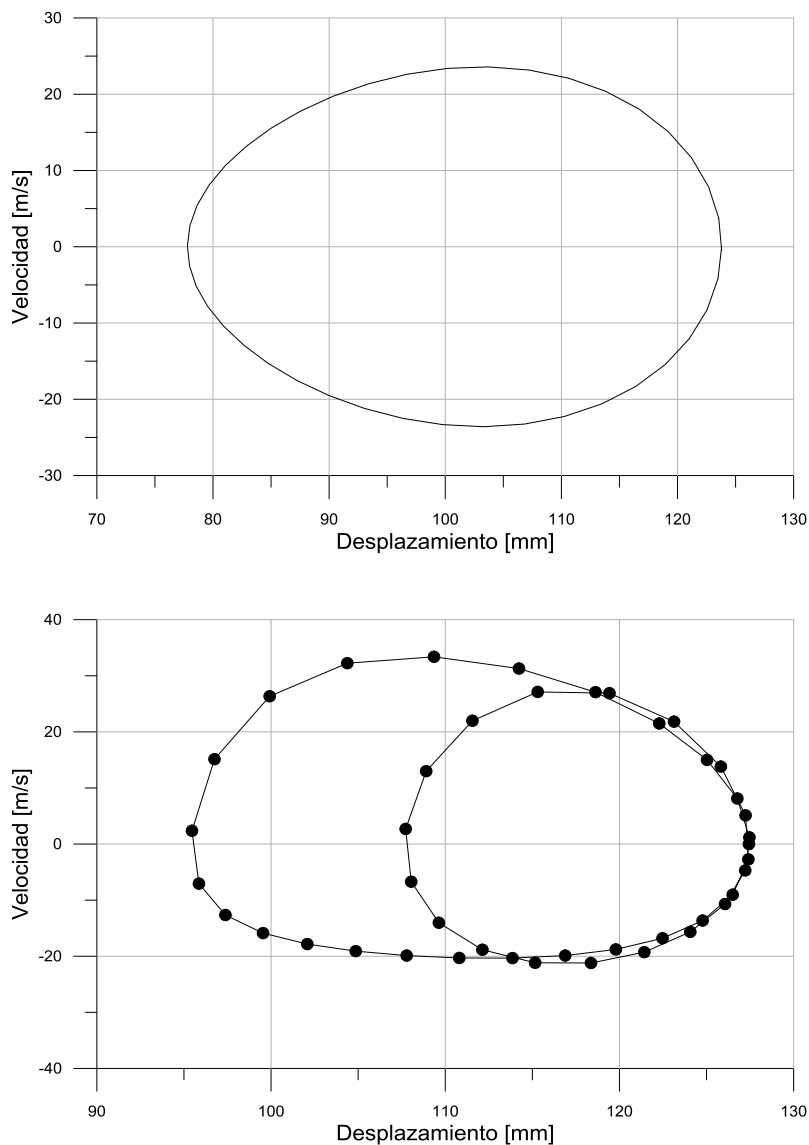


Figura 8. Velocidad contra Desplazamiento para los ciclos Otto y Atkinson.

La figura 9 inicialmente muestra el comportamiento uniforme de la aceleración respecto al desplazamiento para el ciclo Otto, luego, para el ciclo Atkinson se observa la fuerte variación en la magnitud y la dirección de la aceleración.

4. Conclusión

Los ciclos expandidos se utilizan para aprovechar de un mejor modo el combustible utilizado, y como resultado mejorar la eficiencia en los motores de combustión interna. En este sentido, el ciclo de Atkinson, a pesar de que en su concepción inicial, a partir de mecanismos multieslabón, presentó problemas estructurales y

cinemáticos, hoy en día, en conjunto con nuevas tecnologías electrónicas y de control, se erige como prospecto para cumplir con normativas medioambientales en vehículos híbridos en los cuales actúa como fuente de energía principal en rangos de operación que abarcan cargas medias y bajas, punto en el cual operan la mayor parte del tiempo.

En el artículo se describe el comportamiento del mecanismo multieslabón de Atkinson, y se compara gráficamente con el del mecanismo tradicional manivela-deslizador, y se encuentran incrementos significativos en las velocidades y aceleraciones del pistón.

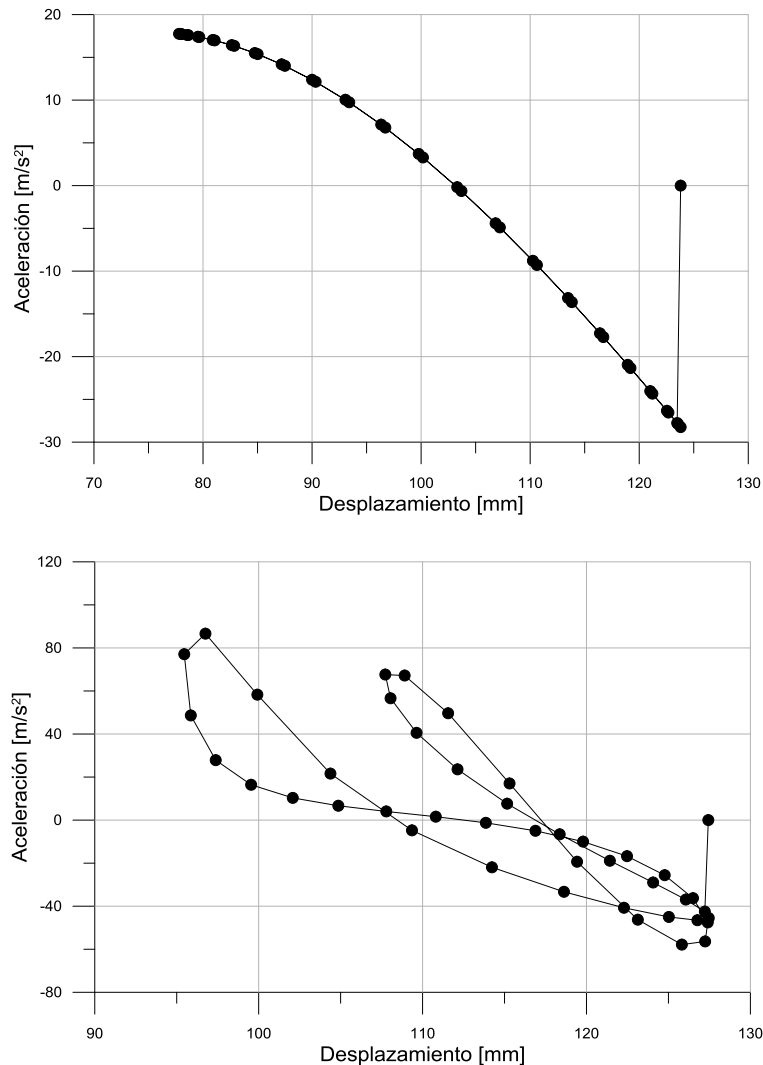


Figura 9. Aceleración contra desplazamiento para los ciclos Otto y Atkinson.

Referencias

- [1] Á. Díaz, J. González, O. González, “Análisis de un generador de HHO de celda seca para su aplicación en motores de combustión interna”, *Rev. UIS Ing.*, vol. 17, no. 1, pp. 143-154, 2018. doi: 10.18273/revuin.v17n1-2018013
- [2] G. García, J. Chacón, A. Chaves, A. Lopez, “Estudio analítico y experimental del desempeño de motores diésel alimentados con bio-oil hidrotratado”, *Rev. UIS Ing.*, vol. 17, no. 2, pp. 115-126, 2018. doi: 10.18273/revuin.v17n2-2018011
- [3] V. Gheorghiu, “Atkinson cycle and very high-pressure turbocharging: increasing internal combustion engine efficiency and power while reducing emissions”, *Hamburg University of Applied Sciences*, Berliner Tor 21, Hamburg Germany, 2016.
- [4] K. Nobuki, N. Kiyoshi y K. Toshihiro, “Development of new 1.8-L engine for hybrid vehicles”, en *SAE Technical Paper*, 2009. doi: 10.4271/2009-01-1061.
- [5] S. Shiga, Y. Hirooka y S. Yagi, “Effects of over-expansion cycle in a spark-ignition engine using late-closing of intake valve and its thermodynamic consideration of the mechanism”, *Int J Auto Tech-Korea*, vol. 2, no. 1, pp. 1-7, 2001.

[6] S.-S. Hou, "Comparison of performance of air standard Atkinson and Otto cycles with heat transfer considerations", *Energy Conversion and Management*, vol. 48, pp. 1683-1690, 2007.

[7] O. Bumbock, E. Schutting y H. Eichlseder, "Automotive Engine Technology", 2018. doi: 10.1007/s41104-018-0029-9.

[8] J. Kentfield, "Extended, and variable, stroke reciprocating internal combustion engines", en *SAE Technical Paper*, 2002. doi: 10.4271/2002-01-1941.

[9] J. B. Heywood, *Internal Combustion Engine Fundamentals*. New York: McGraw-Hill, 1988.

[10] T. Hoeltgebaum, R. Simoni and D. Martins, "Reconfigurability of engines: A kinematic approach to variable compression ratio engines", *Mechanism and Machine Theory*, pp. 308-322, 2016.